

## 제너다이오드의 열화평가를 위한 전압제어 출력 전류원 개발

# Development of a voltage-controlled output current source for zenor diode degradation analysis

김종호 · 장흥기 · 권영목 · 최규식\*  
(주)우진엔텍 기술연구소

Jong-ho Kim · Hong-ki Chang · Young-mok Kwon · Gyu-shik Che\*

R&D Center of Woojinntec Inc, Gyeonggi-do, 18481, Korea

### [요 약]

전자회로에서 부하가 제너다이오드일 경우, 입력전압에 의해 부하의 전류를 제어하고자 할 때 제너다이오드의 항복전압 특성에 따라 제어하고자 하는 출력전류가 변하기 때문에 기존의 전압제어 전류 생성 방법을 적용할 수 없다. 이 논문에서는 입력전압을 이용하여 정격치보다 큰 전류를 제너다이오드에 인가하여 부품의 수명시험을 할 때, 제너다이오드가 경년열화에 의하여 항복전압의 특성이 변하여 부하전압이 달라져도 이에 관계없이 동일한 전류를 낼 수 있는 회로를 개발하였다. 이 방법으로 구성된 회로를 실증하기 위해 각 블록의 부품 값을 적용하고 시뮬레이션 하여 입력전압으로 출력전류를 선형적으로 제어하는 결과를 확인하였다. 결과에 의하면 우리가 측정하고자 하는 항복전압 이상의 입력전압에 대해서 출력전류가 선형적으로 변하며 제너다이오드의 경년열화에 의한 항복전압의 변화와 관계없이 일정한 전류가 흐르는 것을 확인하였다.

### [Abstract]

When zenor diode load current is necessary to be controlled by input voltage as a circuit load, existing voltage controlling method cannot be applied to it because the output current of zenor diode is changed due to breakdown voltage variations. We propose input voltage controlled output current source regardless of zenor breakdown voltage variation due to degradation resulted from severe current applied electronic component life test as a circuit load in this paper. We show breakdown voltage characteristics of this zenor diode circuit through simulation, applying adequate values for each component in order to verify the circuit composed of that method, and then show the result in which output current is controlled by input voltage. We confirmed the output current varies proportional to input voltage, and developed circuit shows a constant value independent of zenor diode breakdown voltage variations due to component degradations.

**Key word** : Current source, Breakdown voltage, Constant voltage circuit, Current regulator, Voltage controlled output current.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.5.501>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 6 September 2017; Revised 18 September 2017  
Accepted (Publication) 21 September 2017 (30 October 2017)

\*Corresponding Author; Gyu-Shik Che

Tel: +82-31-379-3629

E-mail: che@konyang.ac.kr

## I. 서론

전자회로의 부하가 저항이나 임피던스인 경우에는 이 부하에 필요한 전류를 일정하게 공급해주는 전류 원을 만드는 데 있어서 다양한 방법을 사용할 수 있다. 그러나 부하가 제너다이오드(zener diode)일 경우에는 이 제너다이오드를 동작하게 하는 항복전압(breakdown voltage) 때문에 기존의 방법을 적용할 수 없는 문제가 발생한다. 또한 이 제너다이오드가 동일한 정격 항복전압이 설정되었더라도 전자부품 또는 회로 사용에 따른 경년열화에 의하여 항복전압이 변화될 수 있고, 이 때문에 부하측의 전압이 변동되며 최초 설정되었던 입력전류치도 변하게 되는 문제가 생긴다.

제너다이오드와 같이 전자부품의 상태나 경년열화를 평가하는 하나의 방법으로 규정치보다 큰 과전류를 이용한 부품 수명시험(life test)을 수행할 경우가 있다. 이 때 규정치 이상의 큰 과전류를 인가하게 되면 시간이 경과함에 따라 제너다이오드의 항복전압이 점차 변하게 된다. 항복전압이 변하면 부하전압이 변하는 효과를 초래하여 원래 흘려주던 전류 값이 변하게 되어 정확한 부품의 열화특성을 측정할 수가 없다. 그러므로 제너다이오드의 항복전압 변화에 의한 부하의 전압변동과 관계없이 입력전압에 선형적으로 비례하여 출력전류가 생성되는 전자회로의 개발이 필요하게 되었다.

전자회로에서 부하에 필요한 전류를 공급하기 위해 그동안 사용되던 방법들은 입력전압으로 부하측의 전류를 제어하거나(transconductance circuit)[1]-[3], 입력전압의 변화에 관계없이 일정한 전류를 부하에 공급하는 방법(regulator circuit)[4,5]들이었다. 그러나 제너다이오드의 경우처럼 시간 경과에 따라 부하의 전압이 변해도 입력전압으로 출력전류를 일정하게 제어하는 방법은 존재하지 않았다.

따라서 이 논문에서는 부하의 저항이 변해도, 부하의 전압이 변해도 입력전압에 의하여 출력전류가 선형적으로 일정하게 제어되도록 하는 전자회로를 개발하여 제안한다. 이 방법에 의하면 전자부품의 상태나 가속수명 열화시험 등을 수행할 때 부하로 사용하는 제너다이오드의 항복전압이 변화하더라도 처음 인가했던 전류가 동일하게 안정적으로 흐르게 하여 전자부품 시험을 신뢰성 있게 진행할 수 있도록 한다.

이 논문 제2장에서는 부하전압을 일정하게 유지시키기 위한 일반적인 제너다이오드의 적용방법에 대해 논의하였고, 제3장에서는 부하변동에 관계없이 부하전류를 일정하게 유지시켜주는 방법을 소개하였다. 제4장에서는 부하가 제너다이오드일 경우, 전류를 일정하게 공급하고자 할 때의 문제점을 검토하였다. 제5장에서는 부하가 제너다이오드일 때의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 회로를 개발하여 제시하였으며, 제6장에서는 개발된 회로를 실증하기 위해 실제 각 부품의 값을 설정하여 시뮬레이션한 결과를 나타내었고, 마지막으로 제7장에서는 이 논문에서의 연구결과를 최종 요약하였다.

## II. 일반적인 제너다이오드의 적용방법

그림 1에서처럼 부하 R2, R4에 일정전압을 공급하기 위해 가변 입력전압  $V_s$ , 직렬저항 R1, R3, 회로와 병렬로 제너다이오드 VZ1, VZ2를 구성한다. 여기서  $R1=R3$ ,  $R2=R4$ 이다. 이 회로에 항복전압이  $VZ1=15V$ ,  $VZ2=20V$ 인 제너다이오드를 설치하고 입력전압  $V1$ 을 인가하여 서서히 증가시키면 제너다이오드 양단에 걸리는 전압은 아래 그림 2와 같다. 그림에서 보듯 각각의 항복전압에 이른 순간부터 규정된 항복전압이 걸린다. 따라서 제너다이오드가 제 역할을 하려면 여기에 항복전압 이상의 전압이 인가되어야 한다.

여기서 제너다이오드에 흐르는 전류는 항복전압인 VZ 이후의 입력전압에 비례하여 서서히 선형적으로 흐르게 된다. 그림 2에서는  $VZ=15V$ 와  $VZ=20V$ 인 경우를 예로 들었는데, 이 문턱전압을 통과하면서 전류가 선형적으로 흐르게 된다. 그러나 각각에 흐르는 전류는 그림 3에서 보는 것처럼 두 제너다이오드에서 동일하지 않다. 즉, 두 제너다이오드를 통하여 흐르는 전류  $IVZ1$ 과  $IVZ2$ 는 아래와 같은 방정식에 따른다.

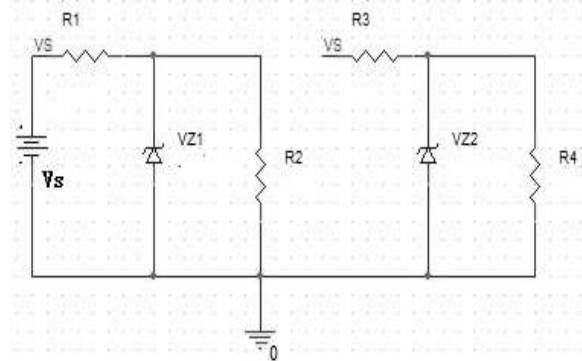


그림 1. 제너다이오드를 이용한 부하의 정전압회로[6]  
Fig. 1. Constant load voltage using zener diode[6].

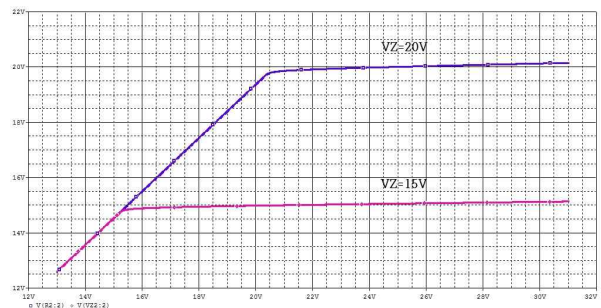


그림 2. 제너다이오드 양단의 항복전압  
Fig. 2. Breakdown voltage across zener diode terminals.

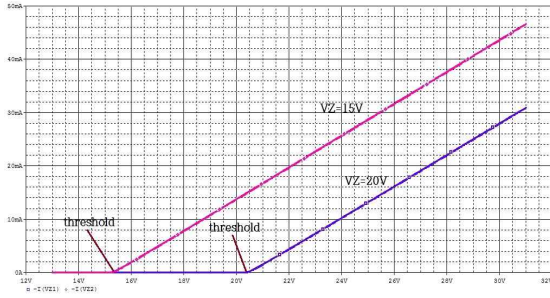


그림 3. 상이한 항복전압의 제너다이오드를 부하로 연결한 경우의 제너전류

Fig. 3. Load zener currents through different breakdown voltages.

$$I_{VZ1} = \frac{V_S}{R_1} - \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} V_{Z1} \quad (1a)$$

$$I_{VZ2} = \frac{V_S}{R_3} - \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4} V_{Z2} \quad (1b)$$

### III. 전압제어 출력전류 공급 방법

전원에 전압을 인가하여 이에 비례하는 출력전류를 생성하는 회로(transconductance circuit)는 아래 그림 4와 같다. 이 그림에서 출력전류  $I_L$ 는

$$I_L = \frac{V_S - V_{BE}}{R_E} \quad (2)$$

이고, 입력전압에 비례하는 일정전류가 부하를 통해 흐른다. 여기서 전압  $V_{BE}$ 는 트랜지스터 Q1의 베이스와 에미터간의 순방향 전압강하로서 상온에서  $V_{BE}=0.65\text{ V}$ 인 것으로 가정한다. 이렇게 성립하려면 부하의 값이 가변적이지 않고 일정해야 한다.

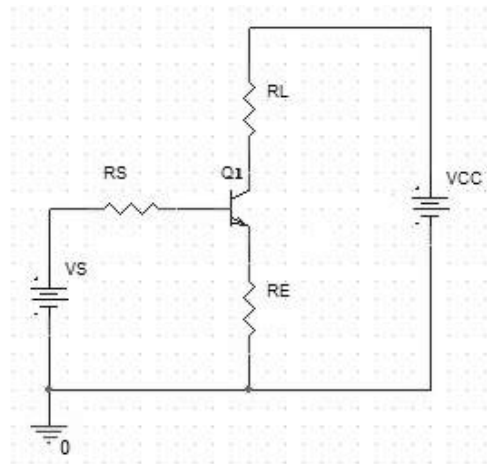


그림 4. 전압제어를 이용한 출력전류 회로[6]  
Fig. 4. Output current circuit using voltage control.

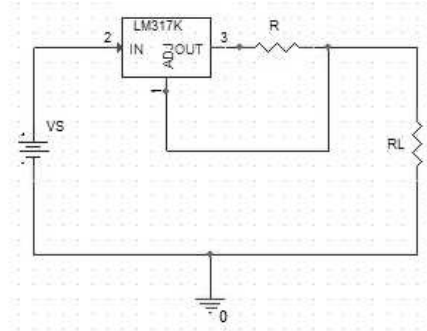


그림 5. 정전류 회로[5]  
Fig. 5. Constant current circuit[5].

그림 5는 입력전압의 변화에 관계없이 출력전류가 일정하게 생성되게 하는 일반적인 정전류 회로(regulator circuit)이다. 이 그림 5의 회로에서 부하의 정전류  $I_L$ 는

$$I_L = \frac{V_{ref}}{R} + I_{Adj} = \frac{1.25}{R} \quad (3)$$

으로 계산된다. 이 회로는 입력전압  $V_S$ 가 변해도 부하에 일정하게 전류가 흐르는 되는 정전류 회로이다.

### IV. 제너다이오드가 부하인 경우의 전류공급 문제점

앞의 그림 4 회로에서 부하 RL 대신 제너다이오드 VZ를 적용한 회로를 아래 그림 6에 나타내었다. 이 회로에서는 제너다이오드에 다음과 같은 전류가 흐르게 된다.

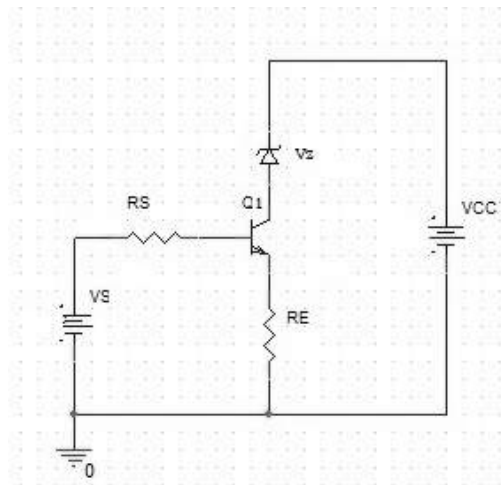


그림 6. 제너다이오드를 부하로 적용한 회로  
Fig. 6. Zener diode circuit as a load.

$$I_E = I_{VZ} = \frac{V_S - V_{BE}}{R_E} \quad (4)$$

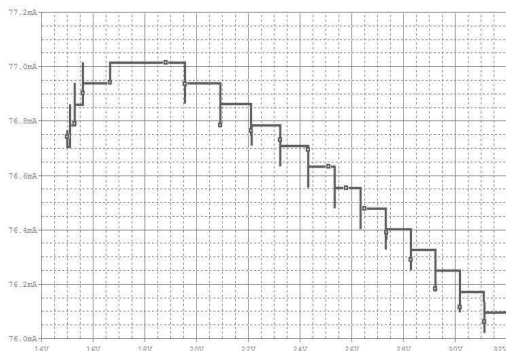
이 식에 의하면 제너다이오드 VZ에는 일정한 전류가 흘러야 한다. 그러나 이 제너다이오드에 전류가 흐르게 되면 항복전압에 이르기 전까지는 부하전류의 증가에 따라 제너다이오드 양단의 전압이 증가하다가 항복전압에 이르게 된 후 출력전류가 발생한다. 그런데 이 전류 값에 이르게 되면 항복전압이 일정하므로 전류의 증가는 RE 양단의 전압을 증가시키게 되어 전체적으로 제너다이오드 양단의 전압을 감소시키는 요인을 초래한다. 따라서 출력전류는 입력전압에 비례하여 선형적으로 증가하는 것이 아니라 불안한 형태를 유지하면서 오히려 감소하게 된다. 이 관계를 그림 7에 나타내었다.

또한 그림 5의 정전류 회로에서도 부하를 제너다이오드로 바꾸면 부하 전압이 제너다이오드의 항복전압 변화에 따라 변하게 되어 출력전류도 변한다. 여기서 입력전압이 정격전압 VZ를 초과하게 되면 VZ의 항복전압과 관계없이 일정한 전류가 흐르게 된다. 이 경우에는 입력전압에 관계없이 일정한 전류가 흐르는 전류 원의 역할을 하므로 입력전압으로 출력전류를 제어하는 것이 불가능하게 된다.

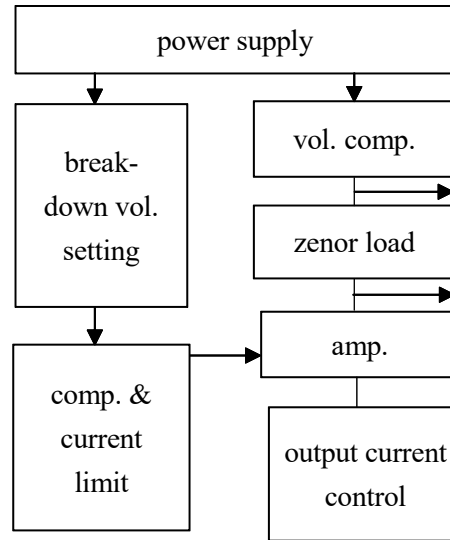
이상의 방법들을 검토한 바와 같이 전자회로에서의 부하가 저항이나 임피던스가 아닌 제너다이오드인 경우에는 사용자가 필요에 의해 입력전압으로 부하 측의 출력전류를 정량적으로 제어하는 방법이 쉽지 않다.

**V. 동작전압에 비례하는 전압제어 전류 원 개발**

상기 회로의 문제를 해결하고자 이 논문에서는 부하전압이 변하는 경우에도 입력전압 제어에 비례하여 일정한 출력전류를 발생하는 회로 방법을 개발하였다. 부하가 제너다이오드일 경우에도 출력전류를 입력전압에 비례하도록 하는 새로운 전압제어 출력 전류 원을 그림 8에 나타난 구성과 같이 개발하였다.



**그림 7.** 제너다이오드의 입력전압 변화 대비 출력전류  
**Fig. 7.** Output current vs. input voltage variation of zener.



**그림 8.** 개발 회로의 구성  
**Fig. 8.** Configuration of developed circuit.

개발 회로는 구성에서 공급전압(power supply)이 부하의 항복전압보다 높은 항복전압을 가진 제너다이오드로 항복전압설정(breakdown voltage setting)을 하여 부하인 제너다이오드의 항복전압 동작범위를 넓히는 것은 물론, 증폭기의 전압 VCB가 역바이어스되도록 함과 동시에 이를 통하여 다이오드와 전류 제한저항으로 이루어진 증폭부의 B-E 전압 보상회로를 거쳐서 집지에 이르도록 고안하였다.

보상회로에서 증폭기(amplifier)의 에미터전압 제너다이오드는 특성이 증폭기의 전압 VBE와 일치하는 제너다이오드를 사용한다. 한편 전압보상(voltage compensation)을 거친 입력전원은 제너다이오드의 항복전압 이상의 전압이 걸리도록 하여 전원전압에 비례하는 전류가 흐르도록 하였다. 증폭기를 통하여 흐르는 제너전류는 출력전류제어(output current control) 회로를 통하여 입력전압에 비례하는 전류가 흐르도록 하였다. 이 출력전류제어 회로는 보상회로 및 전류제한회로에 의하여 출력이 비례하는 전압이 이 양단에 걸리게 하여 출력전류가 입력전압에 비례하도록 개발하였다.

**VI. 개발회로 검증을 위한 실제 시뮬레이션**

개발회로를 검증하기 위해 그림 9와 같이 전류 원 회로를 구성하였다. 회로의 VZ1, VZ2는 항복전압이 다른 두 개의 제너다이오드로서 이들을 부하로 사용할 때 여기에 흐르는 전류가 입력전압의 변화에 선형적으로 변하는지, 그리고 동일한 입력전압에 대하여 항복전압이 다른 두개의 제너다이오드에 흐르는 전류가 동일할지를 평가하기 위해 회로를 구성하였다.

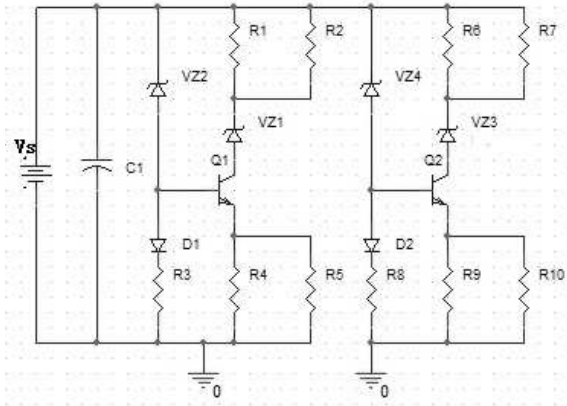


그림 9. 개발방법에 의해 구성된 전압제어 전류원 회로  
Fig. 9. Developed voltage controlled current source.

여기서 제너다이오드 VZ2, VZ4는 동일한 항복전압을 가진 것으로서 트랜지스터 Q1, Q2의 콜렉터와 베이스간에 역방향이 어스가 걸리도록 하였다. 여기서  $VZ2 > VZ1$ ,  $VZ4 > VZ3$ 가 되도록 설정하였고, 다이오드 D1, D2는 경년열화나 동작열화에 따라 트랜지스터의 전압 VBE가 변하는 것을 보상하기 위해 동일한 특성을 가진 것으로 선정하였다.

중양의 CE 증폭회로와 우측의 CE 증폭회로는 동일한 회로이며, VZ1과 VZ3는 경년열화에 의하여 항복전압이 변하는 경우를 분석하기 위해 편의상 구분하였다. 즉,  $Q1=Q2$ ,  $R1=R5$ ,  $R2=R7$ ,  $R3=R8$ ,  $R4=R9$ ,  $R5=R10$ ,  $D1=D2$ ,  $VZ2=VZ4$ 이다.

증폭트랜지스터 Q1, Q2의 에미터전압 VE는

$$V_E = V_B - V_{BE} = V_1 - V_{Z2} - V_{BE} \quad (5)$$

이므로 이 증폭기의 에미터전류 IE는

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B}{R_4 // R_5} = \frac{V_1 - V_{Z2} - V_{BE}}{R_4 // R_5} \quad (6)$$

이다. 즉, 제너다이오드의 항복전압에 관계없이 상기 회로에는 입력 동작전압에 비례하는 선형적인 일정전류가 흐르게 된다. 단, 동작전압은 VZ1과 VZ3의 항복전압 이상이어야 한다. 그리고 VZ2의 항복전압도 VZ1과 VZ3의 항복전압보다 높아야 한다.

그림 9 회로의 성능을 시뮬레이션하기 위해 회로의 각 소자에 다음 표 1의 값을 적용하였다.

표 1. 회로의 부품 적용 값

Table 1. Part values of circuit.

components	values	components	values
V1	+14 V ~ +30 V	R5	200 Ω
C1	10 μF	R6	22 Ω
VZ1	20 V	R7	22 Ω
VZ2	22 V	R8	1.5 kΩ
VZ3	15 V	R9	200 Ω
VZ4	22 V	R10	200 Ω
R1	22 Ω	Q1	TIP29
R2	22 Ω	Q2	TIP29
R3	1.5 kΩ	D1	1N4001
R4	200 Ω	D2	1N4001

이 회로를 분석해보면 다음과 같다.

$$V_B = V_S - V_{Z2} = V_S - 22 \quad (7)$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = V_S - 22.65 \quad (8)$$

$$I_E = \frac{V_B}{R_4 // R_5} = \frac{V_S - 22.65}{0.1} = 10 V_S - 226.5 \quad (9)$$

$$I_C \approx I_E = \{10 V_S - 226.5\} mA \quad (10)$$

즉, 전류 IE가 제너다이오드 VZ1, VZ3에 흐르며 이것이 출력전류로서 입력전압 V1에 선형적으로 비례한다. 단, 상기 식에서 보듯 입력전압 Vs는 22.65 V보다 커야 한다. 이 때 출력측 제너다이오드에 걸리는 항복전압은 그림 10과 같이 15 V인 경우와 20 V인 경우로 나타내었다.

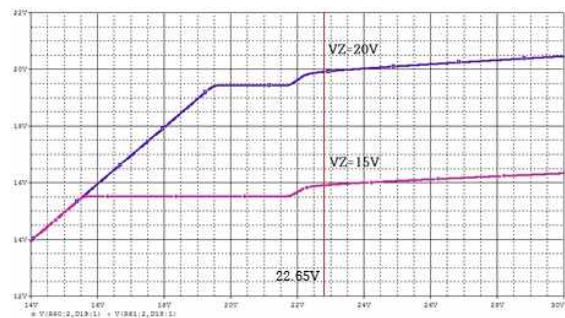


그림 10. 입력전압 변화에 따른 제너다이오드의 항복전압 변화  
Fig. 10. Breakdown voltage variations depending on input voltage changes.

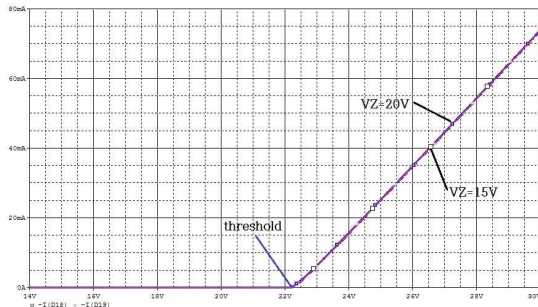


그림 11. 입력전압 변화 대비 출력전류  
 Fig. 11. Output currents vs. input voltages.

측정하고자 하는 제너다이오드에 흐르는 전류의 값을 그림 11에 나타내었다. 입력전압이  $V_{Z1}=20\text{ V}$ ,  $V_{Z3}=15\text{ V}$ 인 두 제너다이오드에 인가되면 동일한 전류가 입력전압에 선형적으로 비례하여 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 이 전류는 방정식(10)을 이용하여 계산한 값과 동일하였다. 이 경우, 항복영역에서 전류가 흐르기 시작하는 문턱전압  $V_{th}$ 는 22.65 V였다.

### VII. 결 론

일반적으로 전자회로에서 전압으로 부하전류를 제어하고자 할 때 입력전압으로 출력전류를 선형적으로 제어하는 방법이나 입력전압의 변화에 관계없이 출력전류를 일정하게 유지시켜주는 방법을 사용할 수 있다. 그러나 부하가 저항이나 임피던스가 아닌 제너다이오드일 경우엔 이러한 방법을 적용할 수 없게 된다. 그 이유는 제너다이오드가 가지고 있는 특성, 즉 입력전압에 의하여 부하의 전류를 제어하려 해도 각 제너다이오드의 항복전압 특성이 달라 제어하고자 하는 출력전류가 변하기 때문에 기존의 방법을 적용할 수가 없는 것이다.

이 논문에서는 입력전압으로 정격치보다 큰 과전류를 제너다이오드에 인가하여 전자부품의 상태나 부품 수명시험을 할 때, 그 기간 동안 경년열화에 의하여 항복전압의 특성이 변함에도 불구하고 부하전압이 달라져도 이에 관계없이 동일한 전류를 낼 수 있는 회로를 개발하였다.

개발된 회로는 전원전압과 출력전류가 입력전압에 비례하

도록 하는 항복전압 설정 영역, 항복전압 설정용 제너다이오드의 정격전류를 규정하는 보상 및 전류제한회로, 입력전압보상회로, 측정대상 제너다이오드, 증폭용 트랜지스터, 출력전류 제어회로로 구성된다. 이러한 방법으로 구성된 회로를 실증하기 위해 각 블록의 부품 값을 적용하여 시뮬레이션한 결과, 정확하게 입력전압으로 출력전류를 선형적으로 제어하는 결과를 확인하였다.

### Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신/에너지기술개발/원자력핵심기술개발사업/원전 제어계측 카드의 전자부품 열화 평가시스템 개발 과제의 지원으로 수행되었습니다.

### References

- [1] X. Ramus, Demystifying the Operational Transconductance Amplifier, Texas Instruments Inc., TX, Application Report SBOA117A, pp1-12, April, 2013
- [2] R. L. Geiger, and E. S. Sanchez-Sinencio, "Active filter design using operational transconductance amplifiers," IEEE Circuit and Device, vol.12, pp20-32, March 1985.
- [3] Koninklijke Philips Electronics, Semiconductor, NE5517 Dual Operational Transconductance, Philips Semiconductor, NY 2002, USA, pp1-15, Dec.2002.
- [4] Analog Device, Understanding how a voltage regulator works, <http://analog.com/power>
- [5] On Semiconductor, 1.5 A Adjustable Output, Positive Voltage Regulator, On Semiconductor, Inc., Phoenix, AZ, USA, LM317/D, pp1-12, Jan. 2002.
- [6] A. Malvino and D. J. Bates, Electronic Principles, 7th ed. New York, NY:McGraw-Hill, 2013.



**김 종 호 (Jong-ho Kim)**

1990년:명지대학교 자연과학대학 물리학과 (이학사),  
 1999년:명지대학교 자연과학대학 대학원 물리학과 (이학박사),  
 2000년 - 2005년 (주)세영엔지니어 부설연구소 연구소장,  
 2009년 - 현재 (주)우진엔텍 부설연구소 연구소장  
 ※관심분야 : 제어계측, 원자력

1992년:명지대학교 자연과학대학 대학원 물리학과 (이학석사)  
 1997년 - 2000년:삼성전자 삼성생명과학연구소 연구원  
 2005년 - 2009년 한국방사선기술(주) 부설연구소 연구소장



**장 흥 기 (Hong-ki Chang)**

1997년 가천대학교 공과대학 전자공학과 (공학사),  
 2000년 ~ 2009년 한국에질런트테크놀로지스 책임 연구원,  
 2013년 ~ 현재 (주)우진엔텍 책임 연구원  
 ※관심분야 : 제어계측, 원자력

1997년 ~ 2000년 한화정보통신 연구원  
 2010년 ~ 2013년 세종기업(주) 책임 연구원



**권 영 목 (Young-mok Kwon)**

1995년:동양공업전문대학교 전자공학과  
 2007~2009년: 한국방사선기술(주) 부설연구소 선임연구원  
 2009~현재: (주)우진엔텍 부설연구소 선임연구원  
 ※관심분야 : 제어계측, 원자력

1999~2007년: 게코전자(주) 개발실 책임연구원  
 2012년:한국방송통신대학교 컴퓨터공학과(이학사)



**최 규 식 (Gyu-shik Che)**

1973년 서울대학교 공과대학 전기공학과 (공학사),  
 1993년 명지대학교 전기공학과 (공학박사),  
 1993년 ~ 2014 건양대학교 의공학과 교수,  
 2015~현재 (주)우진엔텍 고문  
 ※관심분야 : 전자회로, 원자력

1983년 뉴욕공과대학 전기공학과 (공학석사)  
 1978년 ~1993년 한국전력기술 중앙연구소 책임연구원  
 2014~2015 맥스파워 연구소장